

УДК 624.014

Оптимальне проектування сталеві стрижневої конструкції покриття торговельно-розважального комплексу

Пелешко І.Д., к.т.н., Лісоцький Р.В., к.т.н., Балук І.М.

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Анотація: Описано основні конструктивні рішення та виконано оптимізацію конструкції покриття торговельно-розважального комплексу. Визначено оптимальні за критерієм маси параметри несучих ферм і розміри поперечних перерізів елементів покриття.

Аннотация: Описано основные конструктивные решения и выполнено оптимизацию конструкции покрытия торговельно-развлекательного комплекса. Определены оптимальные по критерию массы параметры несущих ферм и размеры поперечных сечений элементов покрытия.

Abstract: Basic structural decisions are described and the roof structure of trade and entertainment complex is optimized. The optimal bearing trusses parameters and cross-sectional dimension of structure elements by the criterion of mass are determined.

Ключові слова: металеві конструкції, стрижневі системи, оптимальне проектування, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Відповідно до потреб спеціальних та спортивних споруд, санітарних вимог до об'ємів приміщень при наявності великої кількості людей збільшуються прогони конструкцій. Застосування будівельних конструкцій зі сталі дозволяє зменшити їхню масу, збільшити габаритні розміри одночасно із забезпеченням достатньої несучої здатності. Вагому частку в сталевих конструкціях будівлі займають покриття, для яких при поступово зростаючих прогонах потрібно знаходити оптимальні рішення для зменшення витрат ресурсів. При цьому необхідно формулювати й ставити такі задачі оптимізації, які б ураховували всі конструктивні, технологічні, експлуатаційні та інші обмеження та вимоги, щодо конструкції покриття великопрогонових будівель та споруд.

Аналіз існуючої літератури. В [10] розглянуто просторові решітчасті покриття, що є ефективним різновидом просторових стрижневих систем. Такі покриття, порівняно із плоскими, можуть забезпечувати кращий розподіл діючих навантажень і передачу їх із прогону на опори за допомогою рівномірних силових потоків. Розглянуто також геометричні форми таких покриттів і основи їхнього формування. При цьому

основна увага приділена оптимальному проектуванню таких конструкцій. У [3] розглянуто покриття будівель великих прогонів, принципи їхнього формоутворення для ефективного використання металу. Якщо з тих чи інших міркувань прийнята неквадратна сітка опор і їхні кроки набагато менші за прогони, то покриття розкладають на несучі і допоміжні елементи конструкції.

У [7] викладено сучасні уявлення про оптимальне проектування стрижневих металевих конструкцій, його основні проблеми, постановки задач оптимізації та методи їхнього розв'язування. У [6] пропонується підхід до процесу формулювання задач оптимізації таких конструкцій у системі автоматизованого проектування, який дозволяє врахувати як вимоги нормативних документів, так і досвід проектування без втручання в код програми. В [5] запропоновано схему математичної моделі стрижневих металевих конструкцій, що забезпечує розроблення та залучення мови запису постановок задач оптимізації до програмного забезпечення OptCAD, орієнтованого на вирішення широкого кола задач проектування.

Формулювання цілей статті. Розглянути, виходячи з досвіду проектування, і оптимізувати конструкцію покриття торговельно-розважального комплексу «Екватор» у м. Рівне. Визначити оптимальні параметри покриття, з метою мінімальних витрат сталі.

Виклад основного матеріалу. Зал торговельно-розважального комплексу являє собою овальну в плані симетричну відносно поздовжньої осі однопрогонову одноповерхову будівлю. Довжина її по осях становить 78 м, найбільша ширина – 48 м. Покриття спирається на залізобетонні колони прямокутного перерізу, що розміщені на осях із кроком $Kr=12$ м.

Ураховуючи досвід проектування сталевих стрижневих конструкцій великопрогонових будівель [10, 3], прийнято конструктивну схему покриття зі сталевих тригранних ферм (рис. 1). Для спрощення виготовлення та монтажу цілої конструкції покриття висоти та ширини несучих ферм прийнято однаковими.

Елементи конструкції покриття, окрім прогонів зі сталі С235, запроектовано зі сталевих безшовних гарячекатаних труб за ГОСТ 8732-78 зі сталі ВСтЗпс. Прогони однакової висоти по фермах покриття – з гарячекатаних двотаврів із кроком 6 м посередині та швелерів по краях конструкції. Несучим елементом покрівлі є сталевий профільований настил. За рахунок будівельного підйому ферм, а також різної висоти опорних столиків для спирання прогонів покриття забезпечується ухил покрівлі 0,025 для відведення води.

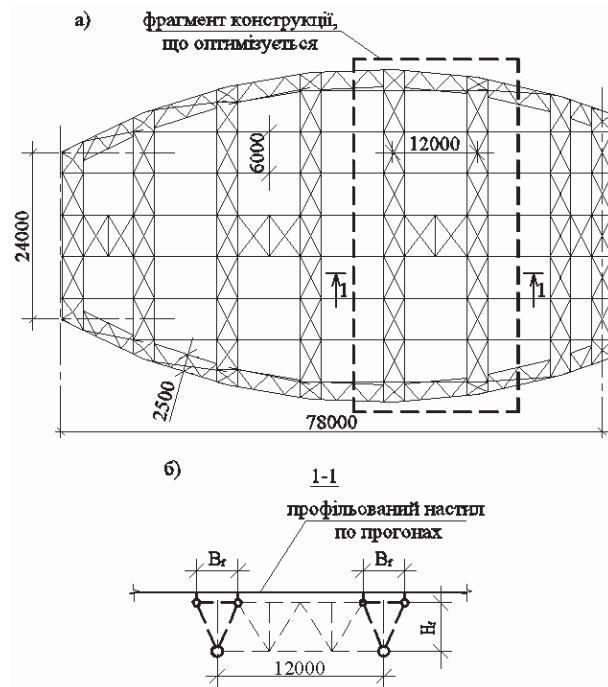


Рис. 1. Схема покриття торговельно-розважального комплексу:
а) – план; б) – розріз несучого блока конструкції

Для забезпечення проектного положення в процесі монтажу та стійкості ферм покриття й зменшення гнучкості нижнього пояса із площини згину їх попарно об'єднано посередині прогону в блоки ферм за допомогою тригранних в'язей. В'язями такої ж форми ферми об'єднано в припорних частинах конструкції покриття. Віддаль між верхніми поясами припорних в'язей $B_{\text{в}} = 2,5$ м.

Стійкість стиснутого верхнього пояса ферм забезпечується його конструкцією, що являє собою горизонтальну ферму із хрестовинною решіткою. Одночасно ці ферми забезпечують сприйняття вітрових навантажень у торцях покриття будівлі.

Ураховуючи високу задану жорсткість колон, можливу появу в них тріщин та невизначеність сил тертя, опорні частини ферм покриття запроєктовано й виконано з однієї сторони шарнірно-рухомими (рис. 2) та шарнірно-нерухомими з іншої. Шарнірно-рухома опорна частина складається з нижньої плити, на якій розміщено котки, на які, у свою чергу, спирається верхній балансир. На останній установлюють ферми покриття. Відстань від верху колони до осі нижнього пояса несучих ферм $H_0 = 0,4$ м.

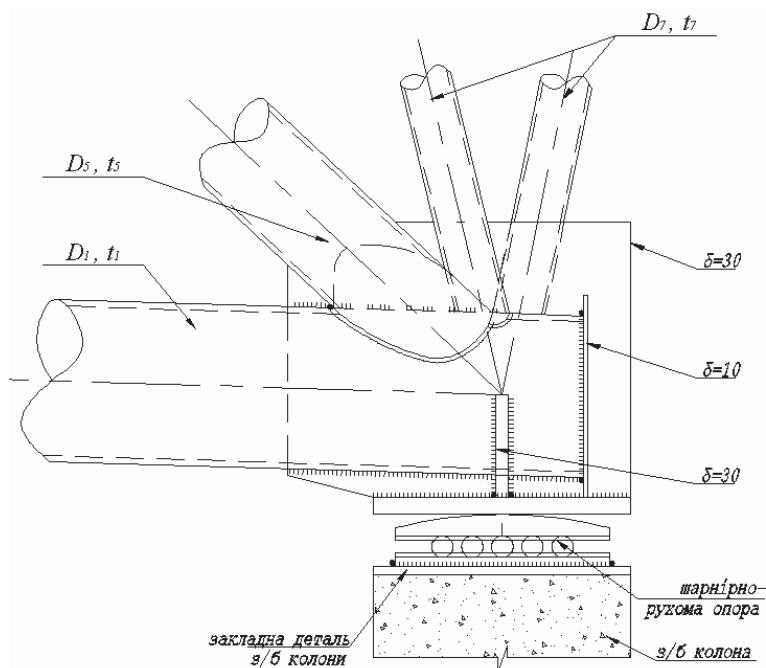


Рис. 2. Шарнірно-рухома опора

Перед тим як формулювати задачі оптимізації конструкції покриття, сформуємо його розрахункову схему.

Відомо, що загальний час оптимізації збільшується зі збільшенням кількості змінних проектування та часу аналізу напружено-деформованого стану конструкції, що залежить, у першу чергу, від кількості вузлів у розрахунковій схемі. Так, у загальній схемі конструкції покриття (рис. 3) кількість вузлів дорівнює 653, стрижнів – 1517. Ураховуючи сучасний рівень методів оптимізації, що реалізовані в доступному програмному забезпеченні, та обмеження обчислювальної швидкодії комп'ютерів, прийнято рішення оптимізувати фрагмент конструкції, який складається з найбільшого несучого блока ферм та із суміжних частин прогонів та приопорних тригранних в'язей між несучими блоками ферм (рис. 1, 4).

Для виокремленого фрагмента призначено додаткові граничні умови, що моделюють вплив відкинutoї частини конструкції покриття. Для цього на вузли прогонів та тригранних в'язей, що знаходяться на межі фрагмента конструкції, накладено опорні в'язі, що запобігають переміщенню за віссю y , а для крайніх вузлів прогонів у фрагменті додатково накладено опорну в'язь, що запобігає повороту вузла навколо осі x . Порівняння результатів аналізу напружено-деформованого стану конструкції покриття

в цілому та її фрагмента підтверджує обґрунтованість прийнятої розрахункової схеми фрагмента.

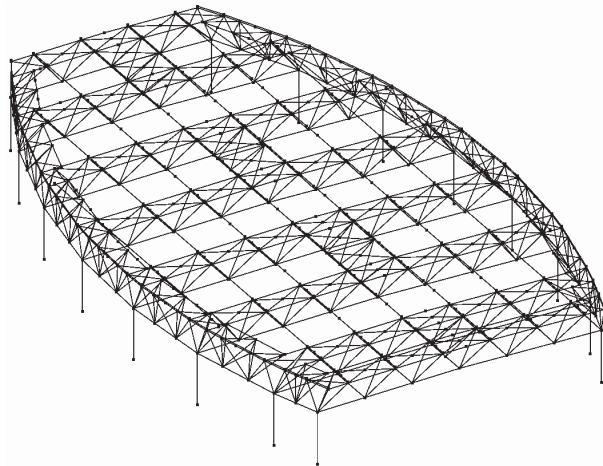


Рис. 3. Схема конструкції покриття

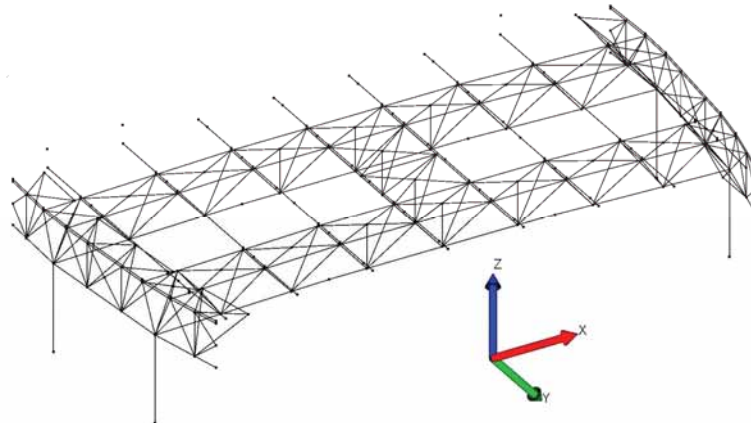


Рис. 4. Схема фрагмента конструкції покриття

Довжини несучих ферм фрагмента становлять $L_5 = 48$ м та $L_6 = 45,7$ м. Будівельні підйоми для цих ферм відповідно складають $S_5 = 0,45$ м та $S_6 = 0,416$ м.

Сформулюємо розв'язувані задачі оптимального проектування конструкції покриття. Перша задача полягає в пошуку таких змінних проектування – розмірів поперечних перерізів стрижнів, при яких маса конструкції є мінімальною. При цьому є фіксованими геометричні параметри розрахун-

кової схеми конструкції-прототипу – ширина B_f та висота H_f (рис. 1), поперечного перерізу несучих тригранних ферм. Результати розв’язування першої задачі оптимізації слугують еталоном для подальшого порівняння.

Друга задача полягає в пошуку таких значень B_f і H_f та розмірів поперечних перерізів стрижнів, при яких маса конструкції є мінімальною.

Прийнято такі позначення розмірів поперечних перерізів елементів: D_i , t_i , $i = \overline{1,11}$ – діаметри й товщини стінок для труб (табл. 1); H_{dw} – висота поперечного перерізу прогонів із двотаврів та швелерів.

Таблиця 1

Закріплення змінних проектування за елементами конструкції покриття

№	Елементи конструкції покриття	Змінні проектування
1	Нижній пояс ферм	D1, t1
2	Верхні пояси ферм	D2, t2
3	Хрестовинні елементи решітки верхніх поясів ферм	D3, t3
4	Інші елементи решітки верхніх поясів ферм	D4, t4
5	Розкоси між нижнім та верхніми поясами ферм	D5, t5
6	Вертикальні елементи (до перетину хрестовинних)	D6, t6
7	Нижній пояс середньої в’язевої ферми	D11, t11
8	Інші елементи середньої в’язевої ферми	D8, t8
9	Нижні пояси бічних в’язевих ферм	D7, t7
10	Інші елементи бічних в’язевих ферм	D9, t9
11	Опорні столики для прогонів	D10, t10

До системи обмежень залучено нормативні обмеження, що висуваються до шарнірно-стрижневих систем при їхній перевірці за двома групами граничних станів: обмеження міцності, стійкості, граничної гнучкості елементів конструкції покриття, обмеження вертикальних переміщень вузлів ферм та прогинів прогонів. Також враховано конструктивні обмеження [5] при проектуванні конструкцій із труб: обмеження мінімальної товщини стінки $t_i \geq 0,3$ см, $i = \overline{1,11}$; обмеження тонкостінності – $D_i/t_i \leq 30$ для поясів й інших контурних елементів та $D_i/t_i \leq 90$ для примикаючих елементів. Обмеження, що формуються з умови конструювання безфасонних вузлів із труб, записано у вигляді $t_1 \geq t_n$, при $n = 5, 6, 7, 9$ та $t_2 \geq t_m$, при $m = 3, 4, 5, 8, 10, 11$.

Зауважимо, що з технологічних та конструктивних міркувань у фермах із круглих труб допущено розцентрування осей у вузлах, що викликає появу моментів, які при певних умовах необхідно враховувати. Це було вико-

нано після завершення оптимізації при конструюванні покриття. При цьому не виникала потреба змінювати поперечні перерізи, оскільки розцентрування осей у вузлах допускалося в недовантажених ділянках поясів ферм.

Задачі оптимального проектування розв'язано з використанням програмного забезпечення OptCAD (www.optcad.com), математичний апарат якого поєднує метод скінченних елементів для виконання статичного лінійного аналізу стрижневих систем та градієнтний метод для вирішення задачі оптимізації.

Змінні проектування задачі оптимізації описуються в спеціальному вікні програми OptCAD (рис. 5).

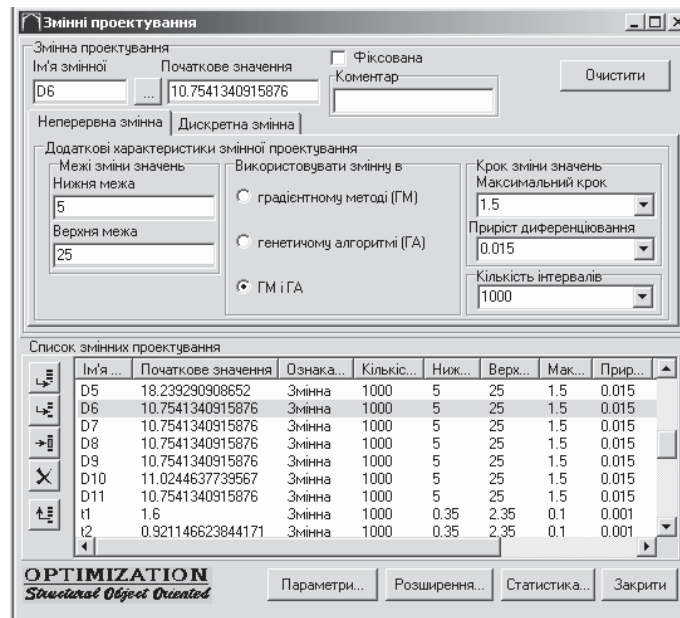


Рис. 5. Вікно для задавання змінних проектування

Координати вузлів при описі розрахункової схеми конструкції покриття представлено у функціональній залежності від змінних та фіксованих параметрів геометричної схеми (рис. 6).

Враховано постійні навантаження від власної ваги всіх конструкцій покриття, елементів вентиляції, електромережі, пожежогасіння та від ліхтарів. Снігове та вітрове навантаження задано згідно з [1] для м. Рівне. Снігові навантаження передаються з покрівлі на прогони конструкції покриття та виражені аналітичними залежностями від змінних параметрів її геометричної схеми. Вітрові навантаження прикладаються на верхні й

нижні пояси бічних в'язевих ферм та задані аналітичними залежностями від висоти несучої ферми покриття H_f .

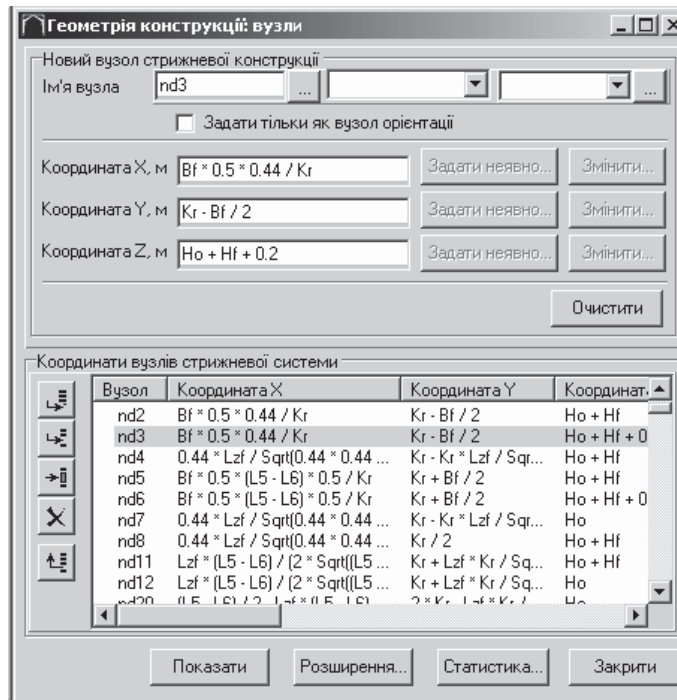


Рис. 6. Вікно для задавання координат вузлів конструкції покриття

Після розв'язування задач оптимізації в неперервній постановці виконано поетапну дискретизацію розв'язку з урахуванням сортментів металопрокату. Результати вирішення задач оптимізації фрагмента конструкції покриття зведено в табл. 2.

У результаті оптимізації конструкції покриття визначено розміри поперечних перерізів стрижневих елементів та параметри несучих ферм конструкції покриття, які забезпечують зниження маси даного фрагмента конструкції покриття на 10,29 % у порівнянні з масою базової конструкції-прототипу.

Розглянемо основні конструктивні рішення, що прийняті для даної конструкції покриття торговельно-розважального комплексу в м. Рівне. З огляду на обмеження габаритів відправних елементів конструкції, які перевозяться від заводу-виготовлювача до будівельного майданчика залізничним транспортом, ферми прогонами до 36 м запроектовано із двох відправних одиниць, інші – із трьох.

Таблиця 2

**Результати оптимізації конструкції покриття
торгівельно-розважального комплексу**

Параметр	Значення змінних проектування для задачі оптимізації			
	першої		другої	
	неперервні	дискретизовані	неперервні	дискретизовані
H_f , м	3,5*	3,5*	4,28	4,28
B_f , м	3*	3*	3,26	3,26
H_{div} , см	30,93	33	29,91	30
$D_1; t_1$, см	35,85; 1,6	37,7; 1,6	34,05; 1,38	35,1; 1,4
$D_2; t_2$, см	27,63; 0,92	27,3; 1,0	25,30; 0,84	24,5; 0,9
$D_3; t_3$, см	8,52; 0,35	8,3; 0,35	7,98; 0,35	8,3; 0,35
$D_4; t_4$, см	8,29; 0,35	8,3; 0,35	7,59; 0,35	8,3; 0,35
$D_5; t_5$, см	18,24; 0,49	18; 0,55	18,17; 0,49	18; 0,55
$D_6; t_6$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_7; t_7$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,58; 0,36	10,8; 0,4
$D_8; t_8$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_9; t_9$, см	10,75; 0,36	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
$D_{10}; t_{10}$, см	11,02; 0,68	8,3; 0,35	7,79; 0,41	8,3; 0,35
$D_{11}; t_{11}$, см	10,75; 0,66	11,4; 0,4	10,22; 0,35	10,8; 0,4
Маса, т	47,237	51,577	43,192	46,270
Маса, %	-	100	-	89,71

Примітка. * Позначено фіксовані значення.



Рис. 7. Монтажне з'єднання верхнього пояса ферми конструкції
на будівельному майданчику

Монтажні з'єднання з метою зниження трудомісткості робіт на будівельному майданчику та скорочення терміну монтажу запроєктовано на високоміцних болтах М24 із сталі марки 38Х «селект» (рис. 8). Заводські з'єднання тригранних ферм конструкції прийнято зварними.

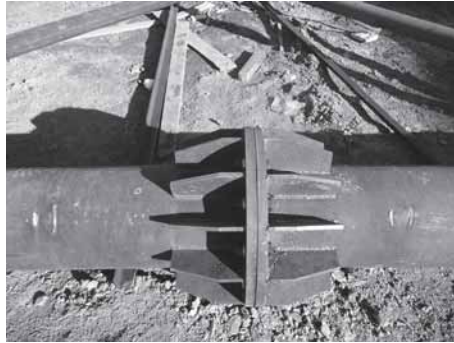


Рис. 8. Монтажне з'єднання нижнього пояса ферми конструкції на будівельному майданчику

Сталеві конструкції покриття торговельно-розважального комплексу виготовлені підприємством групи «Світанок». Реалізована конструкція покриття зображена на рис. 9.



Рис. 9. Загальний вигляд конструкції покриття торговельно-розважального комплексу

Висновки

Прийнято та обґрунтовано розрахункову схему фрагмента стрижневої сталеві конструкції покриття торговельно-розважального комплексу, сформульовано й розв'язано задачі його оптимізації за критерієм маси. Виявлено оптимальні розміри тригранних ферм та розміри поперечних перерізів їхніх елементів, які забезпечили зниження маси металевих конструкцій покриття на 10,29 % у порівнянні з масою базової конструкції-прототипу. Досвід проектування, виготовлення та монтажу розглянутої конструкції підтверджує ефективність застосування труб для стрижнів конструкцій покриття.

Виконані дослідження показали необхідність подальшого вдосконалення методів та програм оптимізації з метою забезпечення розв'язування задач оптимізації стрижневих конструкцій із великою кількістю вузлів та змінних проектування.

Література

- [1] ДБН В.1.2-2006 Навантаження і впливи. Норми проектування – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
- [2] ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини і переміщення. Вимоги проектування / Мінбудархітектури України. – К.: Сталь, 2006. – 10 с.
- [3] Металеві конструкції: Підручник / В.О. Пермяков, О.О. Нілов, О.В. Шимановський та ін. / Під заг. ред. В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. – К.: Сталь, 2008. – 812 с.
- [4] Пелешко І.Д., Балук І.М. Формалізація снігових навантажень для системи оптимізації стрижневих конструкцій OptCAD // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 72. – Київ, ДП НДІБК, 2009. – С. 257 – 264.
- [5] Пелешко І.Д., Юрченко В.В., Ковальчук Ю.Є. Удосконалення математичної моделі стрижневих металевих конструкцій для систем автоматизованого проектування // Вісник ДонНАБА «Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології»: Збірник наукових праць. Вип. 2009-4(78). – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2009. – С. 155 – 160.
- [6] Пелешко І.Д., Юрченко В.В. Про формулювання задач оптимізації металевих стрижневих конструкцій в системах автоматизованого проектування // Вісник НУ «Львівська політехніка» Теорія і практика будівництва, № 441. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. – С. 148 – 152.
- [7] Пермяков В.А., Перельмутер В.А., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. – К.: Сталь, 2008. – 537 с.
- [8] Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
- [9] СНиП II-23-81* Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
- [10] Шимановский В.Н., Гордеев В.Н., Гринберг М.Л. Оптимальное проектирование пространственных решетчатых покрытий. – К.: Будівельник, 1987. – 224 с.

Надійшла до редколегії 22.06.2010 р.